

地球温暖化対策に資する エネルギー地域自立型実証研究

(平成15～17年度)

最終年次報告概要



別海エネルギー地域自立型実証研究実験棟

独立行政法人 北海道開発土木研究所

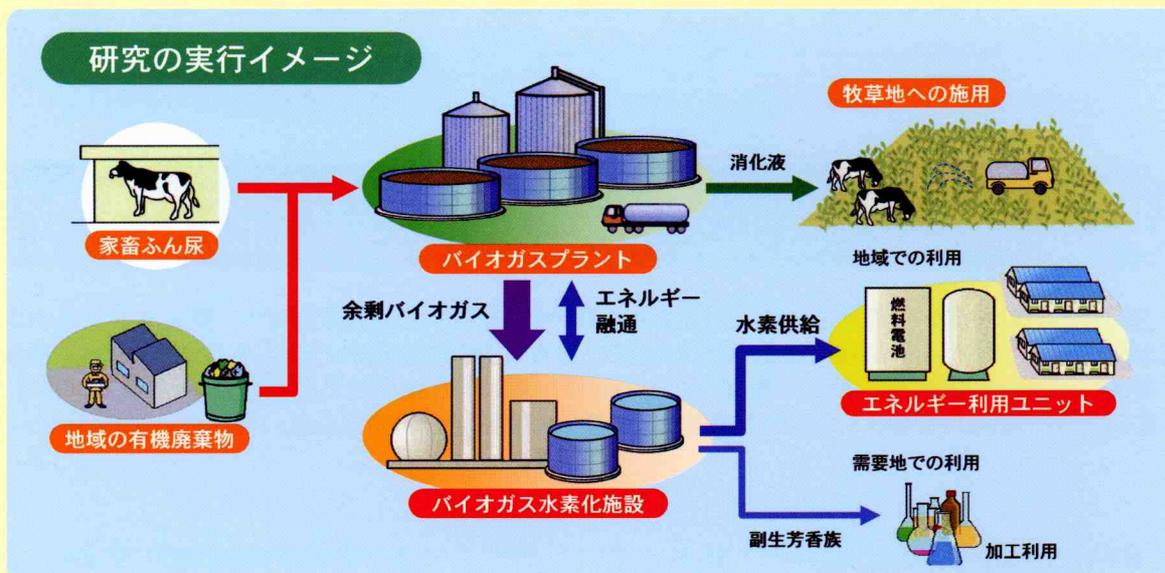
実証研究の背景と目的

近年、化石資源のエネルギー変換に伴って排出される二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスによる地球温暖化の問題が顕在化しており、我が国においても温室効果ガス削減の義務を負っています。

また、積雪寒冷地である北海道は、電気や灯油の消費量が多く省エネルギーや環境に優しいエネルギーの地場創出が求められるとともに、酪農村を始めとする大規模農業地域では多くのエネルギーが必要であることから、産業規模でのエネルギー対策の再考が必要となっています。そのため、従来は火力発電などに頼っていた電気と、灯油などを燃焼することによって得ていた熱を水素・燃料電池を利用することによってCO₂を排出することなく、効率的に供給する技術が期待されています。

そこで、本実証研究では、家畜ふん尿の処理と利用を進めるためのバイオガスプラントを活用して、酪農村に多量に賦存するバイオガスから水素を取り出す技術、水素を簡便かつ安全に貯蔵・運搬・供給する技術、ならびに燃料電池から生み出された電気と熱の効率的利用に関する検討を行いました。

本実証研究を通じて、水素・燃料電池を核とした地域のエネルギー自立型社会の提案を行うものですが、地球温暖化対策や循環型社会形成への貢献のみならず、農村振興ならびに競争力のある新たな産業育成等に活用されることを目指しています。



実証研究の経緯

実証研究は平成15年度に実施設計及び建設工事を終え、平成16年度から実証試験を開始しました。平成16～17年度は、以下の4つの研究課題に沿って実施してきました。

- ①酪農村地域を中心とした水素エネルギー源(バイオガス)の効率的利用
- ②バイオガスからのメタン精製と改質による水素生成技術の実証
- ③有機ハイドライドによる水素の貯蔵と供給技術の実証
- ④燃料電池による新しい農村社会の提案

内容	年度	H15	H16	H17
実施設計		←→		
建設工事			←→	
実証試験			←→	

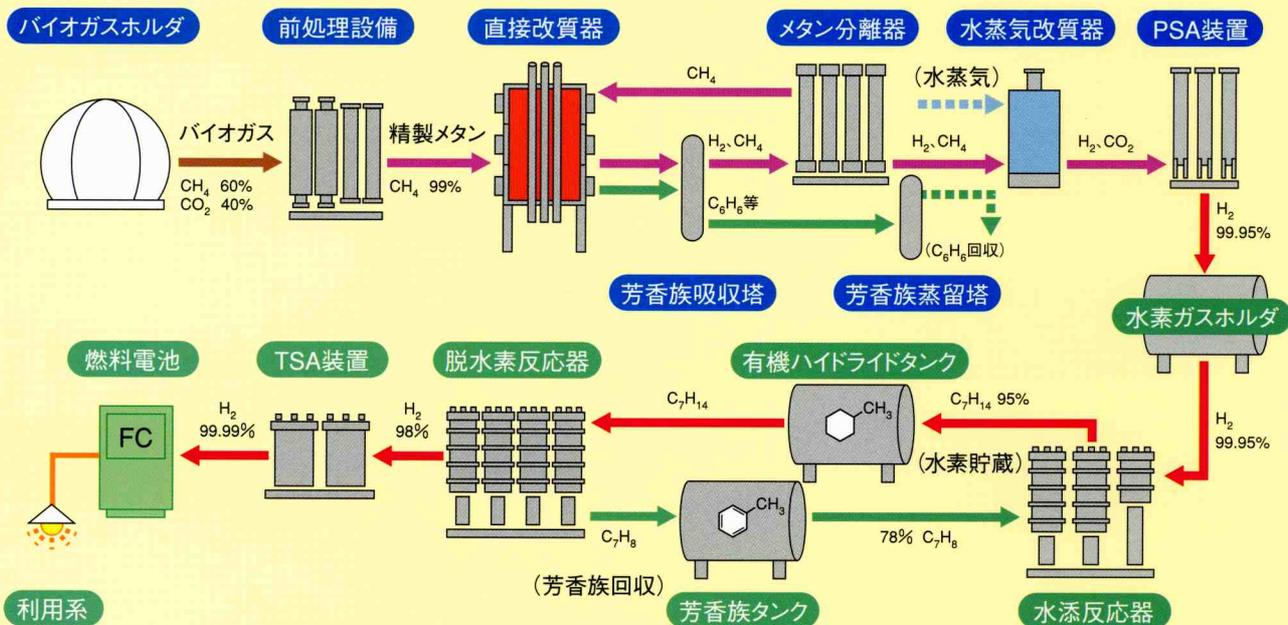
の概要



処理能力	〈バイオガス〉 200~500Nm ³ /d	
主要機器 ・ 触媒等	〈脱硫吸収器〉	ZnO系吸着剤
	〈メタン・CO ₂ 分離器〉	ポリイミド分離膜
	〈直接改質器〉	Mo/ZSM-5系触媒
	〈水蒸気改質器〉	Ru/γ-Al ₂ O ₃ 系触媒
	〈芳香族抽出溶剤〉	α-メチルナフタレン溶剤
	〈PSA装置〉	ゼオライト系吸着剤
水素製造能力	120Nm ³ /d以上(純度99.95%)	

水素製造装置は水蒸気改質器が一般によく知られますが、当施設では北海道で研究蓄積されてきた技術である直接改質法の実証試験を行っています。直接改質器では未反応メタンを循環再利用して転化率を向上させており、触媒性能の維持のため原料メタンに7~10%の水素を添加します。また、各設備から出るオフガスを熱源利用しています。

■プラントI (バイオガス改質・水素製造設備)



■プラントII (有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備)

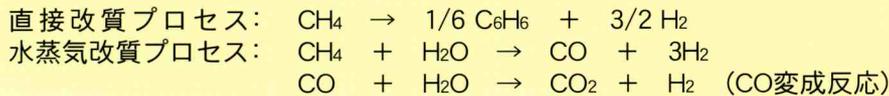


水素貯蔵能力	120Nm ³ /d以上(貯蔵容量3600Nm ³ =30日分)	
主要機器 ・ 触媒等	〈水添反応器〉	Wet-dry多相反応器(Pt/活性炭触媒)
	〈水素貯蔵媒体〉	固定床触媒反応器(Pt/γ-Al ₂ O ₃ 系触媒)
	〈脱水素反応器〉	72%トルエン-メチルシクロヘキサン液
	〈水素供給媒体〉	95%メチルシクロヘキサン-トルエン液
	〈TSA装置〉	活性炭吸着剤
水素供給能力	240Nm ³ /d以上(固体高分子形燃料電池10kW相当)	

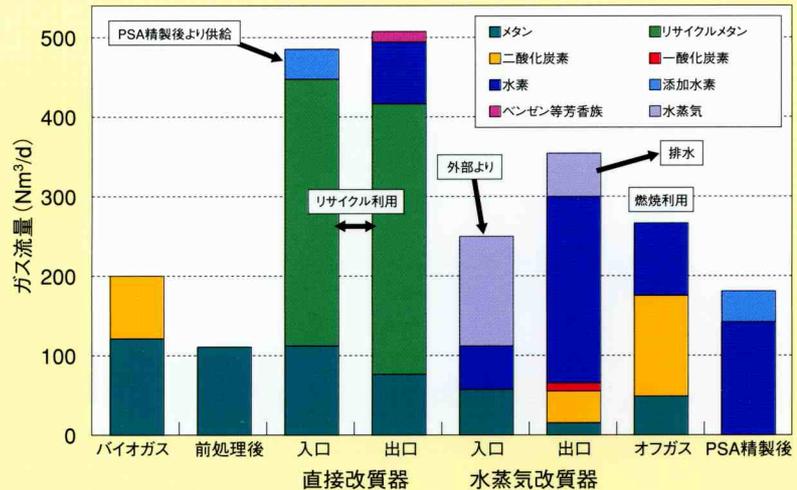
当施設では北海道で研究蓄積されてきた技術である有機ハイドライド法の実証試験を行っています。水素の貯蔵には凝固点の低いトルエン-メチルシクロヘキサン系を用いており、北海道の冬季においても固化する心配がありません。また、水素貯蔵および供給の際に要する圧力は0.9MPa以下としており、高圧ガス保安法の対象範囲外となっています。

プラントI(バイオガス改質・水素製造設備)の物質収支

プラントIでは、前処理によりバイオガスからメタンガスを精製して水素製造用の原料とし、水素の製造は下式に示す直接改質プロセスと水蒸気改質プロセスを併用しました。



バイオガスの前処理では純度99.9%の精製メタンガスを得ることができました。また、直接改質における未反応メタンを水蒸気改質の原料にすると同時に、直接改質の原料としてリサイクル利用しました。このことによって水素とベンゼンの製造効率を高めることができ、200Nm³/dのバイオガスを使用した場合、150Nm³/dの水素(純度99.95%以上)と13L/dのベンゼンが産出されました。さらに、各設備より発生した可燃性オフガスを改質器の燃焼バーナーで使用することによって、エネルギー効率を向上させることができました。



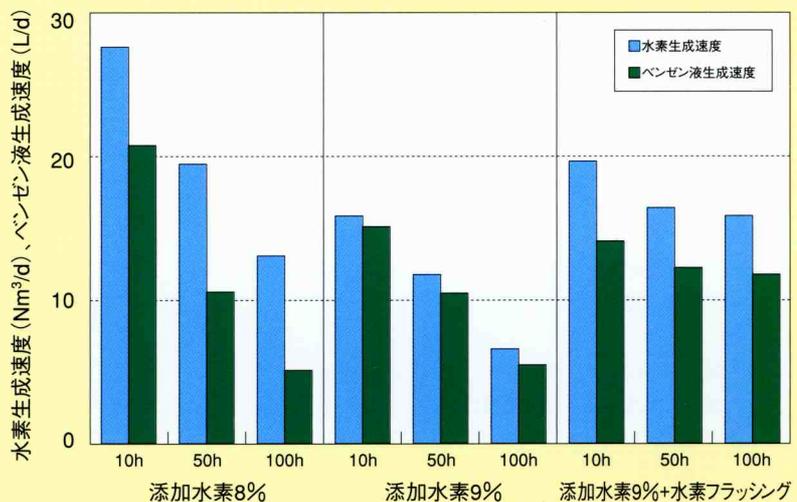
バイオガス改質・水素製造設備の物質収支

直接改質の運転条件と水素等の生成挙動

直接改質プロセスでは特殊な形状の触媒を用いて水素とベンゼンを併産しますが、副反応であるナフタレン生成や炭素生成が起こると触媒の細孔(約5.4Å径)を閉塞し、反応を抑制します。そこで、産出した水素の一部を原料メタンガスに添加して、細孔の閉塞防止を図りました。また、定期的に触媒を洗浄(水素フラッシング)することによって細孔に付着した炭素等を除去し、触媒の劣化抑制を図りました。

添加水素を9%まで増加した場合、水素とベンゼン液の生成速度はいずれも減少しましたが、時間経過に伴う減少割合は小さくなりました。しかしながら、添加水素を9%としても各生成速度の低下を十分に抑制することができませんでした。

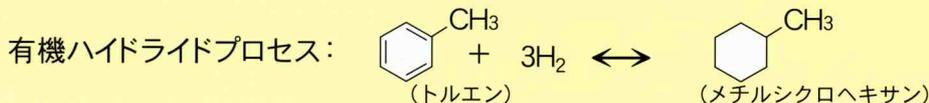
一方、水素添加9%に加えて、直接改質器に循環させた水素を用いて、24h毎に1hの水素フラッシングを行うことによって反応時間50hから100hにかけての各生成速度の減少は抑制され、より一層長時間の改質反応を行える可能性があることが示唆されました。



直接改質における水素とベンゼン生成速度の経時変化

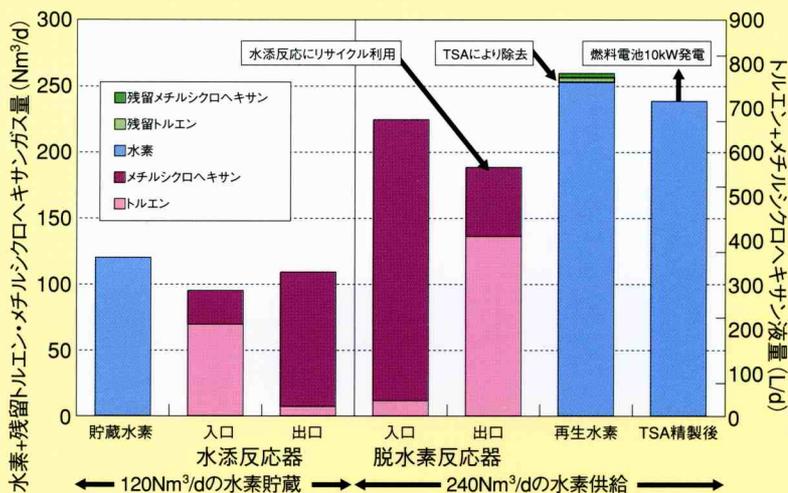
プラントⅡ(有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備)の物質収支

プラントⅡでは有機ハイドライドによる水素貯蔵・供給プロセスを実証しました。下式に示したように芳香族化合物の一種のトルエンに水素を添加し(水添反応)、メチルシクロヘキサンの液体として貯蔵しました。また、需要時にはメチルシクロヘキサンから水素を脱離させて(脱水素反応)、燃料電池に供給しました。



水素貯蔵実験では72%トルエン-メチルシクロヘキサン液を用いました。水素を120Nm³/d貯蔵した場合、95%メチルシクロヘキサン-トルエン液が324L/d生成し、水素を370分の1の容量(重量比4.3wt%)に貯蔵することができました。

水素供給実験では95%メチルシクロヘキサン-トルエン液682L/dを用いて脱水素を行い、純度99.99%以上の水素を240Nm³/d発生させることができました。これは固体高分子形燃料電池の発電出力10kWに相当します。また、脱水素後に発生した72%トルエン-メチルシクロヘキサン液はリサイクルして、再度水素貯蔵試験において使用しました。



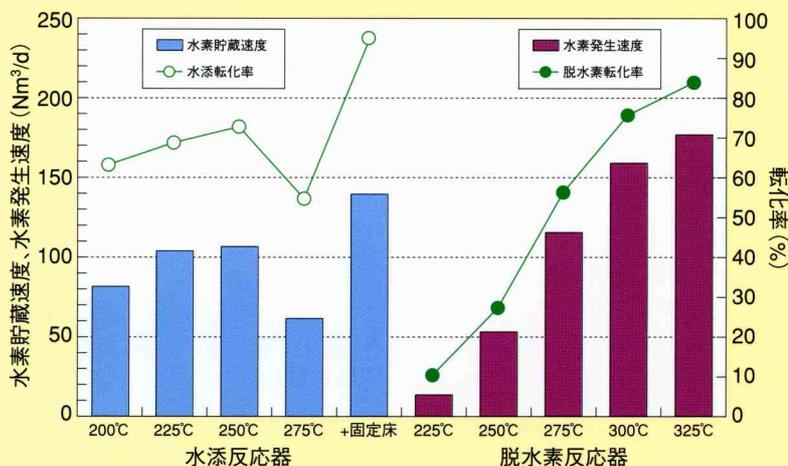
有機ハイドライド水素貯蔵・供給設備の物質収支

水素貯蔵速度、発生速度および転化率

有機ハイドライドプロセスでは特殊な布状の活性炭触媒を用い、水素雰囲気中で触媒上にトルエンを噴霧して水素添加し、メチルシクロヘキサンを生成します。また、メチルシクロヘキサンを触媒上に噴霧して脱水素し、水素を発生させます(Wet-dry多相反応)。反応性を向上させるため、最適な触媒加熱温度を調査しました。さらに、水素貯蔵実験においてはWet-dry多相反応器と連続して固定床反応器を設置し、貯蔵効率の向上を図りました。

水素貯蔵実験では触媒加熱温度が225℃から250℃の範囲で貯蔵速度と転化率は最大となったものの、転化率が低く、目標の120Nm³/dの水素を貯蔵できませんでしたが、固定床と連続させたことにより140Nm³/dの水素を貯蔵することができました。

水素供給実験では触媒加熱温度の上昇に伴って転化率は増加しました。燃料電池の発電出力7kW相当の水素量を目標に脱水素を行ったところ、300℃以上で160Nm³/d以上発生させることができましたが、325℃では時間経過に伴う転化率低下が認められたため、300℃を最適温度としました。



各条件における水素の貯蔵速度、発生速度および転化率

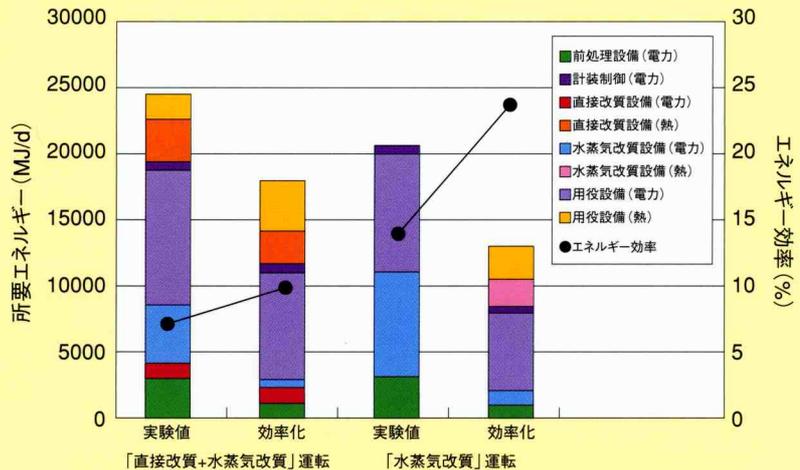
※横軸の温度は触媒加熱温度、水添反応器の+固定床はWet-dry多相反応と連続反応させたときの結果

水素製造設備のエネルギー効率

本実験施設は、現状のままでは効率的な施設となっていないため、プラント設備を見直し、効率化を検討しました。また、直接改質プロセスと水蒸気改質プロセスを併用する「直接改質+水蒸気改質」運転と、水蒸気改質プロセスのみで行う「水蒸気改質」運転における物質・エネルギー収支データより、それぞれの所要エネルギー内訳とエネルギー効率を算出しました。

本実験施設は脱硫設備や水蒸気改質器等の加熱を電気炉によって行っていますが、これらをガス加熱炉とし、オフガスを燃焼利用することで所要エネルギーの削減が可能であると試算されました。

その結果、バイオガス200Nm³/d導入時のエネルギー効率は「直接改質+水蒸気改質」運転で22%、「水蒸気改質」運転で10.3%向上すると考えられます。一方、所要エネルギーのうち用役設備の占める割合が大きいことから、その低減が課題となります。



水素製造設備の所要エネルギー量とエネルギー効率

$$\text{エネルギー効率} = \frac{\text{④}}{\text{①} + \text{②} \times 9.00 \times 24 + \text{③}}$$

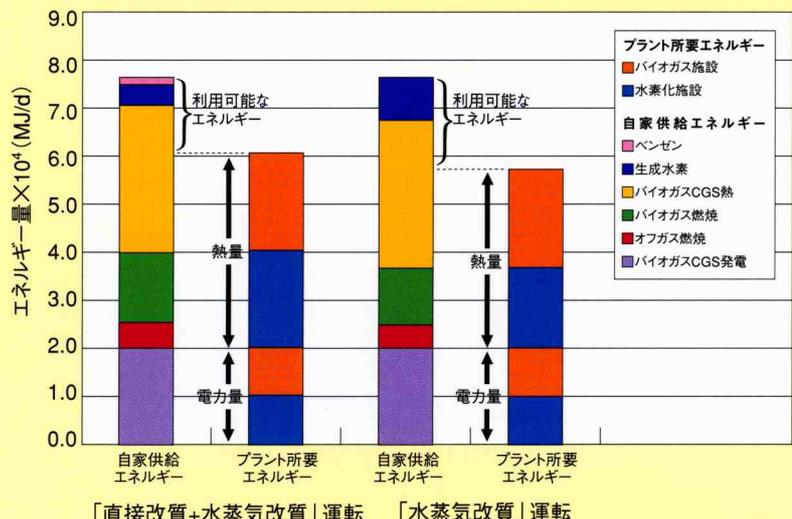
- ①: 投入バイオガス熱量 (MJ/d) ②: 投入電力量 (kW) ③: 投入熱量 (MJ/d) ④: 生成水素熱量 (MJ/d)
 * 電力の1次エネルギー変換係数: 9.00MJ/kWh

バイオガス水素化プラントのエネルギー収支

実用的な水素製造・貯蔵プラントは、バイオガスプラントと一体となり(バイオガス水素化プラント)、その所要エネルギーをバイオガスコージェネレーション等で自家供給することになります。そこで、プラント運転データを基に、バイオガス水素化プラントのシミュレーションを行い、自立稼働の可能性と水素製造量、および余剰エネルギーについて試算しました。

乳牛2000頭規模の施設の場合、「直接改質+水蒸気改質」運転においては380Nm³/d、「水蒸気改質」運転においては950Nm³/dの水素製造が可能であることが試算されました。

また、水素化施設で必要とされる300℃以上の高熱はバイオガスとオフガスの燃焼により供給し、バイオガスコージェネレーションで余剰に発生する60~80℃の温水についてはプロセスガスの予熱や冬期間の凍結防止等への利用が考えられます。



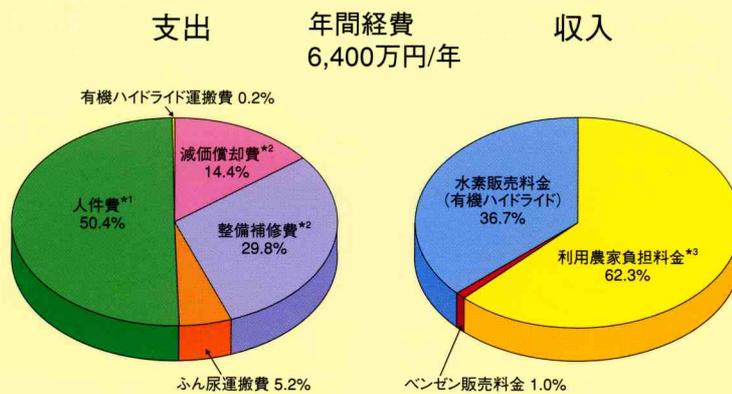
バイオガス水素化プラントのエネルギー収支

プラント運営の経済的成立条件

乳牛2000頭規模のバイオガス水素化プラントの運営における経済収支を検討しました。水素化プラントは「直接改質+水蒸気改質」運転で有機ハイドライドにより水素貯蔵を行うものとし、プラントで製造される水素と有機ハイドライドの販売単価を算出しました。

プラント運営の年間経費は6,400万円となります。この場合の水素販売単価は120円/Nm³、有機ハイドライド販売単価は170円/Nm³となりました。

水素と有機ハイドライドの販売単価をより安価とするためには、プラント施設の効率化、バイオガス発生量ならびに水素製造量の増加、および地域の有機性廃棄物の受入処理による収入等が必要となります。



プラント運営における年間支出・収入の内訳

*1 人件費

プラント運転人員は、バイオガス施設に2名、水素化施設は昼夜運転3交代で3名を配置し、消化液は利用農家による自己搬送としました。

*2 減価償却費及び整備補修費

施設整備補助95%、プラント施設の耐用年数10年として算出しました。

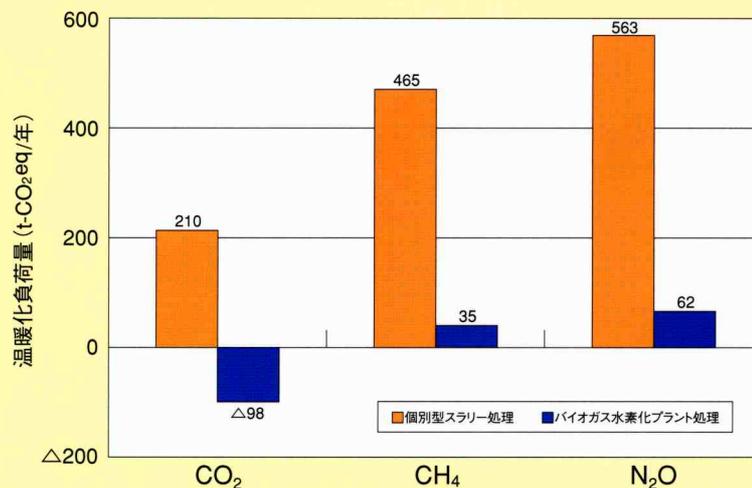
*3 利用農家負担料金

乳牛1頭につき年間20,000円としました。

プラント処理の環境負荷低減効果

乳牛2000頭相当のふん尿をバイオガス水素化プラントにより処理した場合について、温室効果ガスの排出量をLCA(Life Cycle Assessment)手法を用いて試算し、従来の個別型スラリー処理との比較を行いました。

従来の個別型スラリー処理では、年間1238t-CO₂eqの温室効果ガスが排出される。バイオガス水素化プラント処理を行うことで、温室効果ガスの排出量はほぼゼロ(△1t-CO₂eq)となると試算されました。バイオガス水素化プラント処理におけるCO₂排出量が負の値を示す理由としては、処理工程で排出されるCO₂より、発生したバイオガスおよび水素エネルギーで代替される化石燃料の削減量が大きいからです。CH₄およびN₂Oについても、大気中への揮散量が大幅に減少するため、個別型スラリー処理と比較して環境負荷低減効果は非常に大きいと試算されました。



各処理方法における温室効果ガス排出量

研究成果のまとめと今後の検討課題

研究成果のまとめ

●要素技術研究とプロセスの実証

本プラントにおいて、バイオガスからの水素製造、有機ハイドライドを用いた水素貯蔵および有機ハイドライドから燃料電池への水素供給の各プロセスの運転実験を行い、プラントの安定的な稼働を実証し、運転諸元、物質およびエネルギー収支データを取得しました。

●プラントシステムの解析と経済性・環境性評価

プラントの運転実験データをもとに、プラントの効率化(オフガス利用等)の検討およびプラント所要エネルギーを自家供給したバイオガス水素化プラントを想定し、そこから製造可能な水素量、水素販売価格及び温室効果ガス排出量等について試算を行いました。

今後の検討課題

●水素エネルギー 地域利用モデルの提案

これまでの研究成果を踏まえて、今後さらにデータの精査・解析を進めるとともに、効率的な水素輸送や燃料電池を用いた環境にやさしい地域エネルギーの利用、バイオマス起源生成物の利活用等について提案していく計画です。

水素エネルギー地域利用のイメージ



(原料生産地付近での水素製造、エネルギー需要地への輸送、水素・燃料電池による利用)

地球温暖化対策に資するエネルギー地域自立型実証研究

試験担当機関：(独)北海道開発土木研究所

(指導)：国土交通省 北海道局

連絡先

〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号

(独)北海道開発土木研究所 特別研究官

(現(独)土木研究所 寒地土木研究所 特別研究監)

TEL 011-841-1664

FAX 011-841-1230

ホームページアドレス：<http://www.ceri.go.jp>